

MIT HERA UNTER DIE LUPE GENOMMEN

B. HEINEMANN

Liebe DESYaner, liebe Gäste,

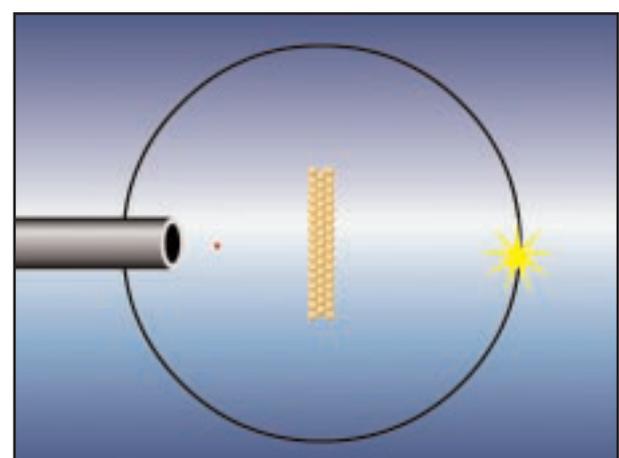
bei HERA beschäftigen wir uns mit den kleinsten Bausteinen des Universums und versuchen herauszufinden, wie diese zusammenhängen und wie sie entstanden sind. Oder "zu erkennen, was die Welt im Innersten zusammenhält". Um das herauszufinden machen wir "Streuexperimente". Dessen Prinzip erkläre ich Ihnen am Beispiel des Rutherford-Experimentes, dem ersten Streuexperiment überhaupt.

Lord Ernest Rutherford hatte vor 91 Jahren die Idee, und es wurde von seinen Doktoranden Marsden und Geiger, nach dem auch der Geiger-Zähler benannt ist, durchgeführt.

Bei diesem Streuexperiment wurden Alpha-Teilchen – die Kerne des Helium-Atoms – auf eine Goldfolie geschossen und eine Apparatur aufgebaut, die aufleuchtete, sobald sie von einem Alpha-Teilchen getroffen wurde. Die Aufgabe der Doktoranden war es zu notieren, wie häufig sie diese Lichtblitze gesehen haben. Das heißt, sie saßen Tag für Tag in einem vollkommen dunklen Raum und haben insgesamt mehr als 100.000 solcher Lichtblitze gezählt.

Die Auswertung dieser Daten ergab, dass die Alpha-Teilchen nicht – wie erwartet – alle mehr oder weniger ihre Flugrichtung beibehielten, sondern manchmal auch rückwärts gestreut wurden. Dies konnte Rutherford nur dadurch erklären, dass das Atom nicht ein homogenes Objekt ist.

Er verglich seine Messungen mit verschiedenen Berechnungen und schloss daraus, dass das Atom aus einem zentralen sehr kleinen positiv geladenen Atomkern und einer tausendmal größeren Hülle von Elektronen bestehen muss.



Schauen wir uns nun einmal genauer an was passiert: Zwischen dem Alpha-Teilchen und dem Kern wirkt eine Kraft und die ist umso grösser je kleiner der Abstand zwischen den beiden. Fliegt ein Alpha-Teilchen in großer Entfernung am Kern vorbei, behält es seine Flugrichtung nahezu bei.

Ist der Abstand jedoch klein, so ist die Kraft stärker, so dass das Alpha-Teilchen geradezu zurückgeschleudert wird.

Wie nah das Teilchen überhaupt an das Zentrum heranzufiegen kann, hängt auch von seiner anfänglichen Energie ab. Benutzen wir Teilchen mit geringer Energie, kommen diese nicht sehr nah an das Zentrum heran. Erhöhen wir aber die Energie, so dringen die Alpha-Teilchen weiter vor in das Zentrum. Dann können wir die Strukturen im Zentrum genauer erfassen. Finden wir, dass ein Teilchen mit hoher Energie unter großem Winkel zurückgestreut wurde, dann wissen wir, dass es ganz nah an das Zentrum herangekommen ist.

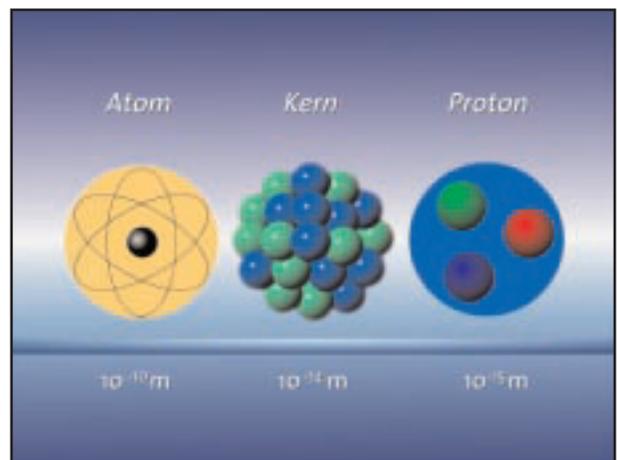
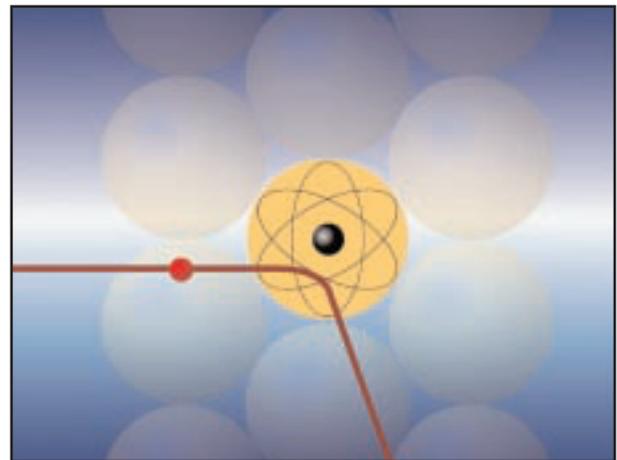
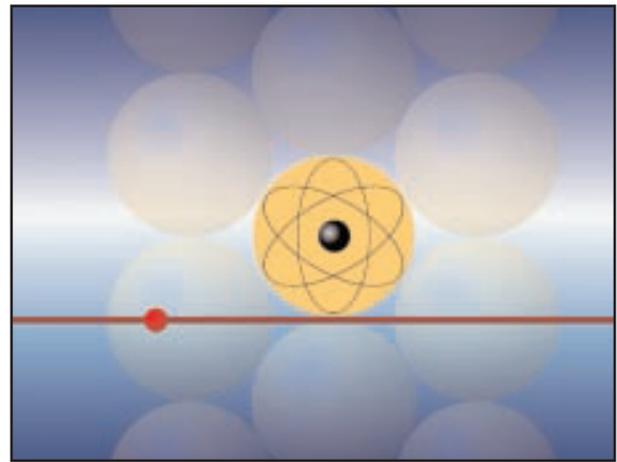
Ein Streuexperiment löst also Strukturen auf ebenso wie ein Mikroskop oder eine Lupe. Und das umso besser, je höher die Energie. Rutherford hat so herausgefunden, was sich im Atom befindet. Wir wollen aber Strukturen untersuchen, die 100.000 mal kleiner sind als das Atom - oder sogar noch kleiner. Deswegen brauchen wir möglichst hohe Energien.

Wir Physiker wissen ja inzwischen, dass das Atom im Zentrum einen Kern hat. Wir wissen weiterhin, dass dieser Kern aus den positiv geladenen Protonen und den elektrisch neutralen Neutronen besteht.

Ebenso klar ist uns, dass sich im Proton Quarks befinden. Uns interessiert: Ist da noch mehr im Proton außer Quarks? Sind diese Quarks nun letztendlich elementare Teilchen? Und wie hängen diese miteinander und mit anderen elementaren Teilchen zusammen?

Um dies zu untersuchen, schießen wir Elektronen –entsprechend den Alpha-Teilchen von Rutherford – und Protonen, die den Goldatomen entsprechen, in einem kreisförmigen 6.3 km langen Beschleuniger – HERA – aufeinander. Die Elektronen und Protonen kreisen entgegengesetzt und können an 2 Punkten des Ringes zusammentreffen, wo wir unsere Experimente H1 und ZEUS aufgebaut haben.

Um nun auszuwerten, was bei dem Zusammentreffen der Elektronen und Protonen passiert, müssen die Doktoranden heute glücklicherweise nicht mehr stundenlang im Dunkeln sitzen und Lichtblitze zählen.



Unsere Messgeräte sind große Apparaturen, die wir hauptsächlich per Computer überwachen. Ein solches Messgerät hat ein Gewicht von ca. 600 Elefanten und die Größe eines 2-Familienhauses.

Mehr als 400 Wissenschaftler und viele weitere Techniker und Ingenieure arbeiten an dessen Wartung und an der Auswertung der Messdaten.

In diesem Apparat treffen sich Elektronen und Protonen 10 Millionen mal pro Sekunde und wir analysieren, was genau bei diesen Reaktionen passiert. Daraus können wir dann Rückschlüsse auf den Aufbau des Protons ziehen.

Ein Ereignis, das bei der Kollision von Proton und Elektron, entstanden ist, sieht so in unserem Messgerät aus.

Das Elektron ist hier von links hereingeflogen, das Proton von rechts. Hier haben sich die beiden getroffen. Das Elektron ist dann hierhin zurückgestreut worden. In diesem Ereignis ist das Elektron bis auf ein tausendstel des Protonradius an ein Quark im Proton herangekommen.

Durch die Messung solcher Ereignisse sich unser Bild des Protons seit dem Anschalten von HERA ziemlich gewandelt. Während wir in den 70er Jahren noch dachten, dass das Proton aus drei Quarks besteht, haben wir u.a. durch HERA gelernt, dass dieses Bild zu grob ist.

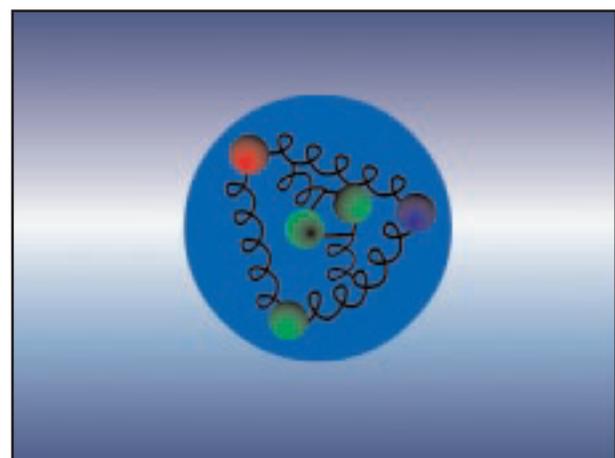
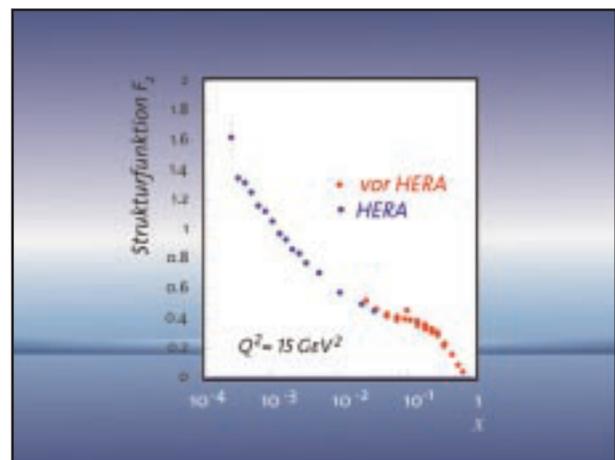
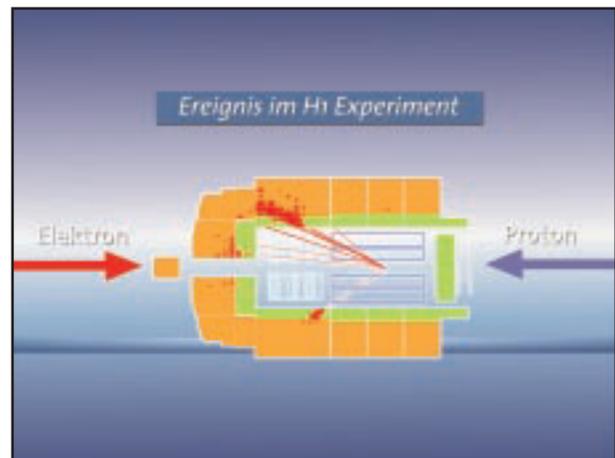
Hier zeige ich Ihnen die Messung einer Größe, die wir die Protonstrukturfunktion F_2 nennen.

Vor HERA hat man diese Punkte gemessen, hier sind die neuen Messungen von HERA.

F_2 steigt stark an je tiefer wir in das Proton schauen.

Daraus schließen wir: das Proton besteht nicht nur aus drei Quarks, sondern wir sehen, dass es sehr dynamisch ist. Es enthält jede Menge Gluonen – das sind diese Krin-gel –, die wiederum neue Quarks und Anti-Quarks und noch mehr Gluonen erzeugen.

Diese Gluonen spielen eine entscheidende Rolle. Sie wurden übrigens vor gut 20 Jahren am DESY entdeckt. Der Name Gluon kommt von englisch „glue“: leimen, zusammenkleben. Es vermittelt die Kraft zwischen den Quarks, die wir "starke Kraft" nennen und die die Quarks im Proton überhaupt zusammenhalten. D.h. die Gluonen leimen die Quarks im Proton zusammen. Gäbe es die Gluonen nicht, würde weder das Proton noch irgendeiner von uns existieren.



Denn: ohne Gluonen kein Proton, daher kein Atomkern, also auch weder Atom, noch Molekül und daher letztlich auch keine Menschen.

Das Studium der starken Kraft, die durch die Gluonen vermittelt wird, ist daher auch einer der Schwerpunkte der Forschung bei HERA.

Wir glauben heute, dass es 4 Kräfte gibt. Diese beschreiben alle Wechselwirkungen zwischen den elementaren Teilchen.

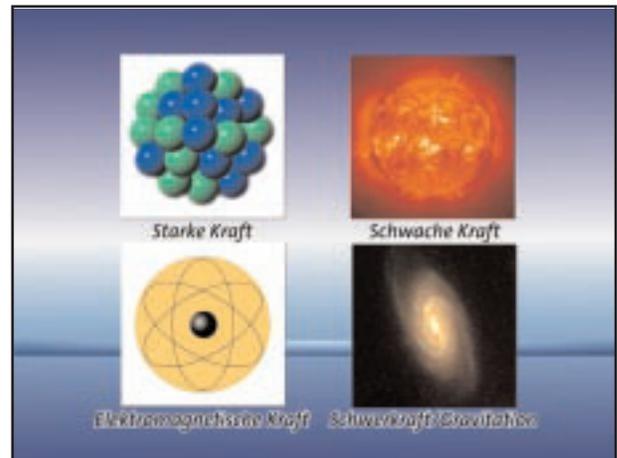
Die stärkste Kraft ist die sogenannte starke Kraft. Sie bindet die Quarks im Proton und hält auch die Protonen und Neutronen im Atomkern zusammen.

Die zweitstärkste ist die elektrische Kraft. Sie alle kennen Sie durch die Elektrizität, die uns ständig umgibt. Sie hält auch das Atom, d.h. dessen Elektronenhülle und Atomkern zusammen.

Die drittstärkste ist dann die sogenannte schwache Kraft. Auch wenn wir sie „schwache“ Kraft nennen so bringt sie doch immerhin die Sonne zum leuchten.

Die schwächste aller Kräfte ist die Schwerkraft. Das ist vielleicht überraschend für Sie, da die Schwerkraft uns Menschen natürlich am geläufigsten ist. Sie hält uns ja auf dem Erdboden fest und unsere gesamte Galaxie – die Milchstrasse - ist nur durch die Schwerkraft gebildet worden. Zwischen den elementaren Teilchen ist sie aber die schwächste Kraft. Ihr Einfluss ist bei Hochenergie-Experimenten noch gar nicht nachgewiesen worden.

Die Stärke einer Kraft bestimmen wir, indem wir messen, wie häufig eine bestimmte Teilchenreaktion im Experiment auftritt.



Die HERA-Messung dieser Häufigkeit ist hier gezeigt als Funktion des kleinsten Abstandes zwischen dem Elektron und dem Quark bei dem Streuprozess genau wie wir es vorhin beim Rutherford-Experiment gesehen haben. Die roten Punkte entsprechen der elektrischen, die blauen der schwachen Kraft. Hier links, bei relativ großen Abständen, tritt die rote Reaktion viel häufiger auf als die blaue. D.h. die elektrische Kraft ist viel stärker als die schwache Kraft. Gehen wir aber nach rechts treten beide Reaktionen gleich häufig auf. Also: Beide Kräfte sind gleich stark, wenn Elektron und Quark nur noch einen Abstand von einem 1000-stel des Protonradius haben.

B. Segulin:

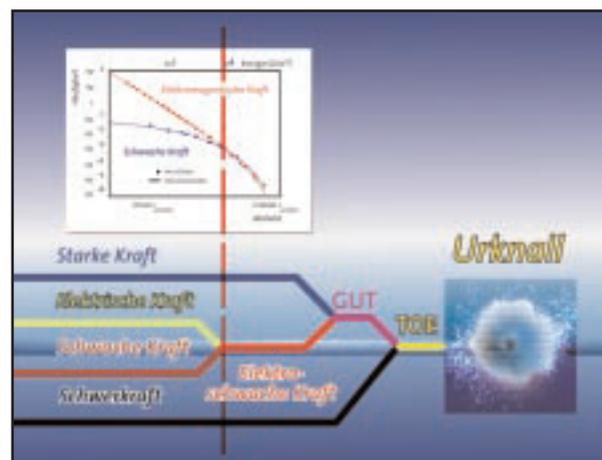
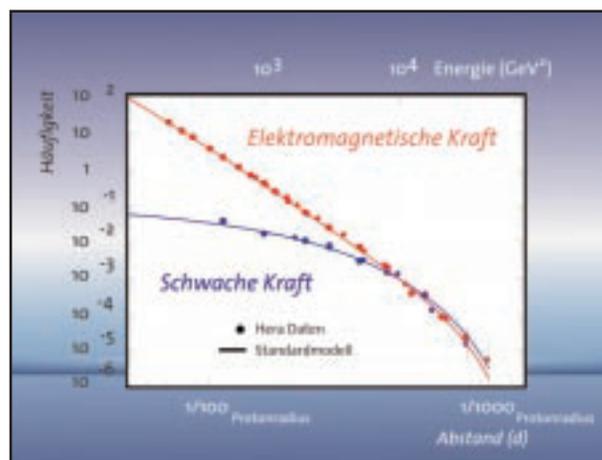
D.h. diese beiden vollkommen verschiedenen Kräfte sind plötzlich gleich?

Ja! Das herauszufinden war eine der wichtigsten Entdeckungen in der Teilchenphysik. Seit den 70er Jahren gibt es nämlich eine Theorie, die praktisch alle Ergebnisse der Teilchenphysik erklärt, und auch warum die beiden Kräfte gleich stark werden: unser sogenanntes „Standardmodell“. In dem Bild ist es durch die beiden Kurven, die –wie Sie sehen – den Daten folgen, wiedergegeben. Was aber ist mit den anderen Kräften, z. B. der starken Kraft? Sie ist hier noch viel stärker. Ist sie überhaupt irgendwann auch einmal gleich stark und wenn, bei welchem Abstand? Leider haben wir auf diese Fragen keine Antwort! Das ist besonders ärgerlich, da wir glauben, dass genau das der Schlüssel ist zu einem tieferen Verständnis des Urknalls und dem was danach passiert ist!

Man stellt sich nämlich folgendes vor:

Bei einem bestimmten Abstand sind die elektrische und schwache Kraft gleich groß – das haben wir gerade gesehen. Diese Abstände hatten die Teilchen im frühen Universum nach weniger als einer Milliardstel Sekunde nach dem Urknall. Wir wollen aber schließlich genauer wissen, was nach dem Urknall passiert ist. Wir denken, dass alle Kräfte beim Urknall gleich stark waren und sich dann nach und nach aufgespalten haben. Zunächst gab es eine Urkraft, d.h. alle Kräfte, die wir heute kennen, waren gleich stark. Dann hat sich die Schwerkraft bei klitzekleinen Abständen abgespalten. Kurz danach hat sich auch die starke Kraft gelöst und letztlich haben sich dann auch die elektrische und schwache getrennt.

Eine Theorie, die alle Kräfte vereinigt nennen wir "Theory of Everything" oder auch im Volksmund „Weltformel“. Sie soll eine Erklärung für die physikalischen Vorgänge nach dem Urknall liefern und die Zusammenhänge zwischen den elementaren Bausteinen des Universums klären. Wir arbeiten uns an diese Theorie hier von links heran, im Moment sind wir hier (elektroschwache Vereinigung) und da (TOE) wollen wir letztlich hin. Da (GUT) wären wir aber auch schon ganz glücklich!



B. Segulin:

Sie wissen also, was in der Milliardstel Sekunde nach dem Urknall passiert ist...?

Nein, wir wissen was NACH der ersten Milliardstel Sekunde passiert ist, d.h. in der 2., 3. usw. Aber das hilft uns letztlich nicht viel! Die Theorie, die das kann und die ich Ihnen gerade gezeigt habe – das Standardmodell –, befriedigt uns nämlich nicht. Das Standardmodell enthält noch viele Parameter, für deren Werte wir keine Erklärung haben und deren Zusammenhänge wir nicht verstehen: z.B. die Masse des Elektrons und der Quarks.

Hätten diese Parameter aber andere Werte, so wäre unser Universum vollkommen anders und höchstwahrscheinlich würde keiner von uns existieren und niemand könnte sich überhaupt den Kopf über derartige Fragen zerbrechen. Das Standardmodell erklärt auch nicht, wieso die starke Kraft stärker ist als die elektrische und schwache. Heerscharen von Theoretikern versuchen eine Theorie zu entwickeln, die wenigstens einige dieser Lücken in der Theorie schließt, so dass es inzwischen eine Unmenge unterschiedlicher Modelle gibt. Ich zeige Ihnen nun, wie wir bei HERA testen, ob irgendeines davon richtig ist oder zumindest in die richtige Richtung geht.

Wir können unsere Messdaten mit verschiedenen solcher Theorien vergleichen.

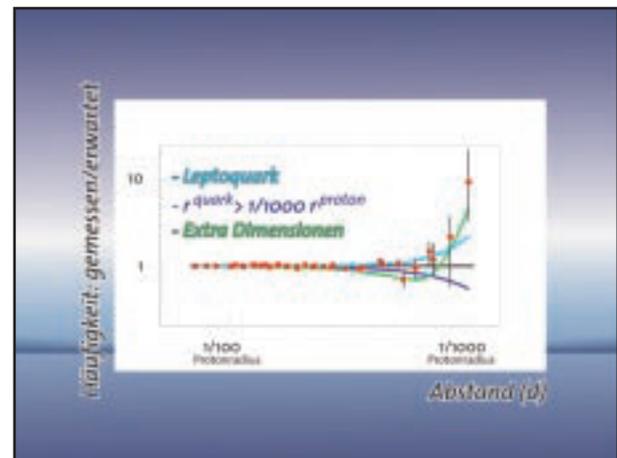
Die roten Punkte sind unsere Messungen im Verhältnis zum Standardmodell. Alle Messpunkte bei 1 bedeutet Übereinstimmung mit dem Standardmodell. Die drei Kurven in türkis, blau und grün sind die Vorhersagen von Theorien, die weiterführen in Richtung der Vereinigung aller Kräfte.

Die türkisfarbene hier ist z.B. ein Modell, in dem die starke, elektrische und schwache Kraft den gleichen Ursprung haben. In diesem Modell gibt es neue Teilchen, die aus einem Elektron und einem Quark bestehen. Man nennt sie Leptoquarks.

Oder die dunkelblaue: Sie stellt dar, was wir messen würden, wenn die Quarks nicht unendlich klein wären, sondern „nur“ 1000 mal kleiner als das Proton. Wobei „nur“ hier natürlich in Anführungszeichen steht. 1000 mal kleiner ist schon SEHR viel kleiner, ca. das Verhältnis der Höhe der Expo-Halle zu der des Mount Everest!

Oder die grüne hier. Die kommt selbst mir als Experimentalphysikerin etwas absurd vor! Man stellt sich hier vor, dass es nicht nur unsere 3 Raum-Dimensionen und die Zeit gibt, sondern noch 7 weitere Dimensionen, die sich eingerollt haben und so klein sind, dass sie weder mit der Lupe noch mit Beschleunigern sichtbar sind.

Unter bestimmten Umständen könnte dann plötzlich die Schwerkraft – obwohl sie so schwach ist - doch eine Rolle spielen bei HERA.



Wie gesagt, klingt etwas absurd, aber wir können es nicht ausschließen, solange wir es nicht gemessen haben. Wie Sie sehen, treffen all diese Theorien unterschiedliche Voraussagen. Allerdings lässt sich schlecht beurteilen, welche die Daten am besten wiedergibt, da die experimentellen Unsicherheiten relativ groß sind dort wo es am spannendsten wird: d.h. bei den kleinen Abständen, wo die größten Unterschiede zwischen den Theorien auftreten.

Unsere Aufgabe als Experimentalphysiker ist es, diese Unsicherheiten zu verkleinern. Denn je kleiner sie sind, desto besser können wir herausfinden welches Modell die Natur gewählt hat. Wie machen wir das? HERA läuft jetzt seit acht Jahren und hat sein Plansoll erreicht. Wir bauen aber dieses Jahr HERA um. Danach werden wir die Teilchenreaktionen ungefähr 5 mal häufiger als jetzt beobachten können, so dass die Unsicherheiten dann noch kleiner werden.

Wir hoffen, durch die Ergebnisse, die wir dann bei DESY erhalten, ein Stückchen, wenn auch evtl. nur einen kleinen Bruchteil, weiter voran zu kommen auf dem Weg zur Erkenntnis „was die Welt im Innersten zusammenhält“.

